

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.584.4

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-10



Сезонная и суточная изменчивость потоков CO₂ и CH₄ у поверхности почвы в лесных и травянистых экосистемах черноморского побережья Краснодарского края

Маргарита В. Кочкина¹, Дарья А. Карпунина², Дарья С. Леонова², Владимир В. Пушкин³,
Александр В. Ольчев^{1,2}, Александр А. Полухин¹, Сергей К. Гулев¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия

Контактное лицо

Маргарита В. Кочкина, инженер лаборатории экспериментальной физики океана, Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН); 117997 Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, 36.

Тел. +79067835460

Email moreinty@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-2763-8344>

Формат цитирования

Кочкина М.В., Карпунина Д.А., Леонова Д.С., Пушкин В.В., Ольчев А.В., Полухин А.А., Гулев С.К. Сезонная и суточная изменчивость потоков CO₂ и CH₄ у поверхности почвы в лесных и травянистых экосистемах черноморского побережья Краснодарского края // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 114-124. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-10

Получена 17 октября 2025 г.

Прошла рецензирование 14 января 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

В работе представлена оценка влияния опада и структуры растительного покрова на потоки диоксида углерода (CO₂) и метана (CH₄) у поверхности почвы в природных экосистемах черноморского побережья Северного Кавказа. Полевые исследования проводились на карбоновом полигоне Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Краснодарский край, район Геленджика) в летние сезоны 2024 и 2025 годов с использованием автоматической почвенной камеры и портативного инфракрасного газоанализатора LI-7810. Одновременно с измерениями почвенных потоков проводились наблюдения за температурой и влажностью почвы. Установлено, что наличие растительного опада приводит к увеличению эмиссии CO₂ за счёт усиления дыхательной активности почвенных микроорганизмов и растений, а также одновременно усиливает процессы метанотрофии, обеспечивая дополнительное поглощение CH₄. Отмечена выраженная сезонная и суточная изменчивость интенсивности газообмена, обусловленная температурно-влажностными условиями и типом растительности. Наибольшие значения потоков CO₂ и CH₄ зафиксированы на травянистых участках, отличающихся более высокой инсоляцией и интенсивным прогревом почвы. Полученные результаты восполняют дефицит данных наблюдений для черноморского побережья Северного Кавказа и подтверждают их высокую чувствительность к климатическим колебаниям. Материалы исследования могут быть использованы для уточнения параметров моделей углеродного цикла, совершенствования национальной системы мониторинга парниковых газов и разработки региональных стратегий адаптации к климатическим изменениям.

Ключевые слова

Потоки CO₂, потоки CH₄, растительный опад, углеродный цикл, почвенное дыхание, метанотрофия, лесные экосистемы, травянистые экосистемы, Северный Кавказ.

Seasonal and daily variability of CO₂ and CH₄ fluxes at the soil surface in forest and grassland ecosystems of the Black Sea coast of Krasnodar Territory, Russia

Margarita V. Kochkina¹, Daria A. Karpunina², Daria S. Leonova², Vladimir V. Pushkin³, Alexander V. Olchev^{1,2}, Alexander A. Polukhin¹ and Sergey K. Gulev¹

¹Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Southern Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Gelendzhik, Russia

Principal contact

Margarita V. Kochkina, Engineer, Laboratory of Experimental Ocean Physics, P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; 36 Nakhimovsky Prospekt, Moscow, Russia 117997. Tel. +79067835460

Email moreinty@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-2763-8344>

How to cite this article

Kochkina M.V., Karpunina D.A., Leonova D.S., Pushkin V.V., Olchev A.V., Polukhin A.A., Gulev S.K. Seasonal and daily variability of CO₂ and CH₄ fluxes at the soil surface in forest and grassland ecosystems of the Black Sea coast of Krasnodar Territory, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):114-124. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-10

Received 17 October 2025

Revised 14 January 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

This paper evaluates the influence of plant litter and vegetation structure on soil fluxes of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) in natural ecosystems on the Black Sea coast of the North Caucasus. Field studies were conducted at a carbon supersite operated by the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences in the Gelendzhik district of Krasnodar Territory during the summers of 2024 and 2025. An automatic soil chamber and a LI-7810 infrared gas analyser were used in the study. In addition, soil flux, temperature, and moisture measurements were conducted. The presence of plant litter was found to increase CO₂ emissions, while simultaneously enhancing methanotrophic processes and promoting CH₄ uptake. Significant seasonal and daily variability in gas exchange was observed due to variations in temperature, humidity and vegetation types. The highest CO₂ and CH₄ fluxes were recorded in grassy areas with better insolation and intense soil warming. A stable dependence of fluxes on soil temperature and moisture was revealed. The results obtained fill a gap in observational data for the region where aridity is increasing and abnormal weather events are becoming more frequent. Therefore, research into carbon exchange is particularly relevant. This study can improve the accuracy of carbon cycle models, develop a national monitoring network for greenhouse gas fluxes and propose regional adaptation strategies to climate change.

Key Words

CO₂ fluxes, CH₄ fluxes, plant litter, carbon cycle, soil respiration, methanotrophy, forest ecosystems, grassland ecosystems, Northern Caucasus.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые в настоящее время высокие темпы изменения климатических условий в глобальном масштабе большинством экспертов связываются с повышением концентрации парниковых газов в атмосфере, и прежде всего, углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4), от антропогенных и природных источников. Их динамика рассматривается как один из ключевых факторов глобального потепления и напрямую отражается на функционировании климатических процессов в различных географических регионах. С учётом ключевой роли природных экосистем в регулировании атмосферного баланса парниковых газов, особое значение приобретают исследования, направленные на изучение процессов, определяющих потоки CO_2 и CH_4 и углеродный баланс этих экосистем [1; 2].

Наземные экосистемы выполняют двойную функцию: с одной стороны, растительный покров экосистем поглощает CO_2 в процессе фотосинтеза и аккумулирует его в органическом веществе, а с другой – экосистемы выделяют CO_2 в атмосферу в результате дыхания растений и разложения почвенной органики. Кроме того, в зависимости от активности почвенных микробных сообществ и условий среды экосистемы могут, как выделять, так и поглощать CH_4 [3; 4]. Потоки этих парниковых газов между почвой и атмосферой являются центральным звеном глобального углеродного цикла. Их пространственная и временная изменчивость отражает ключевые механизмы функционирования экосистем и позволяет уточнить их вклад в климатические процессы.

Особая роль в формировании углеродного баланса экосистем принадлежит почве – сложной биогеохимической системе, в которой сосредоточены основные процессы накопления и высвобождения углерода, определяющие обмен CO_2 и CH_4 между экосистемой и атмосферой [5; 3]. В почве протекают процессы почвенного дыхания и метанотрофии, определяющие баланс углеродных потоков. Существенное влияние на эти процессы оказывает растительный опад – источник свежего органического углерода для микробных сообществ [6; 7]. Растительный опад представляет собой совокупность отмерших частей растений (листьев, хвои, веточек, коры, плодов), накапливающихся на поверхности почвы и служащих основным источником органического вещества в наземных экосистемах. Он обеспечивает поступление углерода и питательных элементов в почвенную систему, формируя субстрат для микроорганизмов и определяя интенсивность процессов разложения, минерализации и дыхания почвы [8].

Поступление опада запускает так называемый «инициирующий эффект ризосферы» (*priming effect*) – изменение скорости минерализации органического вещества почвы под влиянием нового субстрата [9]. Этот эффект проявляется, когда добавление свежего органического вещества стимулирует активность микроорганизмов, ускоряя разложение не только нового, но и старого («фонового») органического углерода. В зависимости от условий *priming effect* может усиливать эмиссию CO_2 или, напротив, способствовать стабилизации органического углерода в

почве, одновременно изменяя интенсивность процессов метанотрофии [6; 10].

Однако интенсивность дыхания и метанопоглощения определяется не только поступлением органического вещества, но и внешними факторами – температурой, атмосферными осадками и освещённостью, которые регулируют активность микроорганизмов и растений [11; 12]. Избыточное увлажнение или перегрев почвы могут замедлять биотические процессы, изменяя баланс газообмена и направление потоков парниковых газов.

Несмотря на значительный прогресс в изучении механизмов почвенного газообмена, региональные особенности этих процессов, особенно в экосистемах Северного Кавказа, остаются пока малоизученными. Между тем именно в этом регионе в последние десятилетия наблюдаются ускоренные темпы климатических изменений, проявляющиеся в аридизации климата, увеличении продолжительности засушливых периодов и учащении экстремальных погодных явлений. Эти изменения оказывают комплексное воздействие на функционирование экосистем и могут существенно перераспределять их роль в глобальном углеродном цикле. Учитывая высокую продуктивность и разнообразие экосистем Северного Кавказа, изучение потоков CO_2 и CH_4 в этом регионе, очевидно, имеет не только региональное, но и глобальное значение.

Важным шагом к восполнению дефицита данных о потоках парниковых газов в разных регионах России стало развитие сети карбоновых полигонов, создаваемых в рамках национальных и международных климатических инициатив [13; 14]. Эти стационарные экспериментальные площадки предназначены для круглогодичного мониторинга потоков парниковых газов и изучения факторов, определяющих углеродный цикл экосистем. Данные, полученные на карбоновых полигонах, позволяют оценивать пространственно-временную изменчивость эмиссии и поглощения CO_2 и CH_4 , формировать научную основу для управления углеродным балансом и разработки стратегий смягчения климатических последствий.

Настоящее исследование направлено на оценку потоков CO_2 и CH_4 в почвах природных экосистем черноморского побережья Северного Кавказа, а также определение влияния на потоки растительного опада и различий в структуре растительности (лесные и травянистые экосистемы) в летние сезоны 2024 и 2025 годов [6; 9]. Особое внимание уделено сезонной и суточной динамике газообмена, что позволяет глубже понять механизмы взаимодействия почвы, растительности и климатических факторов, формирующих углеродный баланс экосистем Северного Кавказа, а также восполнить дефицит данных наблюдений для региона, достаточно уязвимого к современным климатическим изменениям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования потоков парниковых газов у поверхности почвы проводились на базе карбонового полигона Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, расположенного вблизи г. Геленджик (Краснодарский край, Черноморское побережье Северного Кавказа). Климат исследуемой территории относится к переходному типу от восточно-средиземноморского к

влажному субтропическому, с преимущественно сухим и теплым летом, и мягкой зимой [9]. Береговая часть карбонового полигона отличается неоднородным рельефом и высокой пространственной неоднородностью растительного покрова, представленного травянистыми, кустарниковыми и древесными формациями. Преобладающий тип почв – дерново-карбонатные. Северная часть карбонового полигона занимает около 25 % общей площади и покрыта преимущественно сосновым лесом, в составе которого доминирует сосна пицундская (лат. *Pinus brutia* var. *pityusa*). В древесном ярусе встречается также дуб пушистый (лат. *Quercus pubescens*). Практически отсутствует кустарниковый ярус, травяной и моховой покров. Второй участок характеризуется преобладанием кустарниковой поросли и травянистой растительности. Наиболее распространенным видом кустарников является держидерево (лат. *Paliurus spinachristi*), реже встречается грабник (лат. *Betulaceae*), единично – сумах дубильный (лат. *Rhus coriaria*). Среди травянистых форм часто отмечается иглица понтийская (лат. *Ruscus aculeatus*). Площадь данного участка составляет около 75 % территории береговой части карбонового полигона.

Для оценки пространственной изменчивости газообмена на исследуемой территории было выделено 17 экспериментальных площадок, классифицированных по структуре растительности на лесные и травянистые типы. Для каждой группы площадок дополнительно учитывалось наличие или отсутствие растительного опада. Для анализа суточной динамики газообмена из общего числа площадок были выбраны четыре наиболее репрезентативные, характеризующиеся типичной структурой и видовыми особенностями растительности.

Измерения потоков CO₂ и CH₄ выполнялись с использованием почвенной камеры Smart Chamber (LI-COR, США), соединенной с инфракрасным газоанализатором LI-7810 (LI-COR, США), который обеспечивал одновременное определение концентраций и потоков искоемых парниковых газов с высокой точностью [15]. Продолжительность экспозиции камеры составляла 2–3 минуты, а количество повторных измерений на каждой площадке – не менее трёх. Температура и влажность почвы регистрировались датчиком HydraProbe (Stevens, США) на глубине 5 см.

Наблюдения потоков парниковых газов на экспериментальных участках проводились регулярно, начиная с 2022 года. С 2024 года в программу исследований было включено изучение влияния вклада растительного опада на формирование результирующих потоков. В 2024 и 2025 годах измерения охватывали весь летний период, что позволило проанализировать как сезонную, так и суточную изменчивость потоков парниковых газов.

Обработка данных осуществлялась в соответствии с методическими рекомендациями по исследованиям на карбоновых полигонах Российской Федерации [15]. Расчёт потоков осуществлялся с помощью встроенного программного обеспечения измерительного комплекса. Статистическая обработка данных проводилась в среде Microsoft Excel: для каждой измерительной площадки определялись средние значения потоков и их стандартные

отклонения, а также фиксировались различия между вариантами экспериментов (опад/без опада, лес/травостой). Для визуализации сезонной и суточной динамики газообмена использовались стандартные графические инструменты Microsoft Excel.

Выбранный дизайн эксперимента и примененный подход к обработке данных обеспечили сопоставимость результатов между различными участками и позволили выявить влияние растительного опада и структуры растительности на потоки CO₂ и CH₄ у поверхности почвы.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Летняя изменчивость потоков за 2024 и 2025 годы

Потоки парниковых газов, измеренные на территории карбонового полигона, характеризовались ярко выраженной сезонной и межгодовой изменчивостью. В разные периоды летних сезонов 2024 и 2025 годов скорость эмиссии CO₂ почвой существенно варьировала, что было связано, прежде всего, с различиями температурно-влажностных условий на отдельных участках (рис. 1–2).

Сравнение динамики температуры и влажности почвы в летние сезоны 2024 и 2025 гг. (рис. 2) показало, что лето 2024 года отличалось более высокими температурами и пониженной влажностью почвы по сравнению с 2025 годом. Наибольшие значения эмиссии CO₂ наблюдались в июне, когда сочетание умеренных температур и достаточного увлажнения способствовало активной жизнедеятельности растений и почвенных микроорганизмов. К августу скорость выделения CO₂ почвой снижалась вследствие иссушения верхнего слоя почвы и ослабления активности почвенной биоты. В более жарком и сухом 2024 году общая эмиссия CO₂ была ниже, чем в 2025 году, когда умеренные температуры и более равномерное распределение осадков обеспечивали устойчивый уровень дыхательных процессов (рис. 3, 4).

Пространственная неоднородность потоков внутри полигона также была весьма заметной. Различия определялись как структурой растительного покрова, так и особенностями рельефа. Оптимальный фон температуры и почвенной влажности способствовали активизации почвенного дыхания, тогда как перегрев и дефицит почвенной влаги вели к угнетению микробной активности и снижению интенсивности эмиссии CO₂. Высокая чувствительность почвенного дыхания к изменениям атмосферных условий подчеркивает его значимую роль в кратковременных изменениях углеродного баланса экосистем.

Анализ пространственно-временной изменчивости потоков CH₄ показал, что почвы карбонового полигона на протяжении всего периода наблюдений сохраняли устойчивую способность к поглощению CH₄ (рис. 4). Амплитуда поглощения варьировала в зависимости от погодных условий и заметно различалась между участками с разным типом растительного покрова. Наибольшие значения регистрировались при умеренной почвенной влажности и средних температурах, тогда как периоды интенсивного перегрева и засухи сопровождались снижением метанотрофной активности.



Рисунок 1. Географическое расположение карбонового полигона Института океанологии им. П. П. Shirshov РАН с обозначением местоположения экспериментальных площадок

Figure 1. Geographical location of the carbon supersite of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, with locations of experimental plots

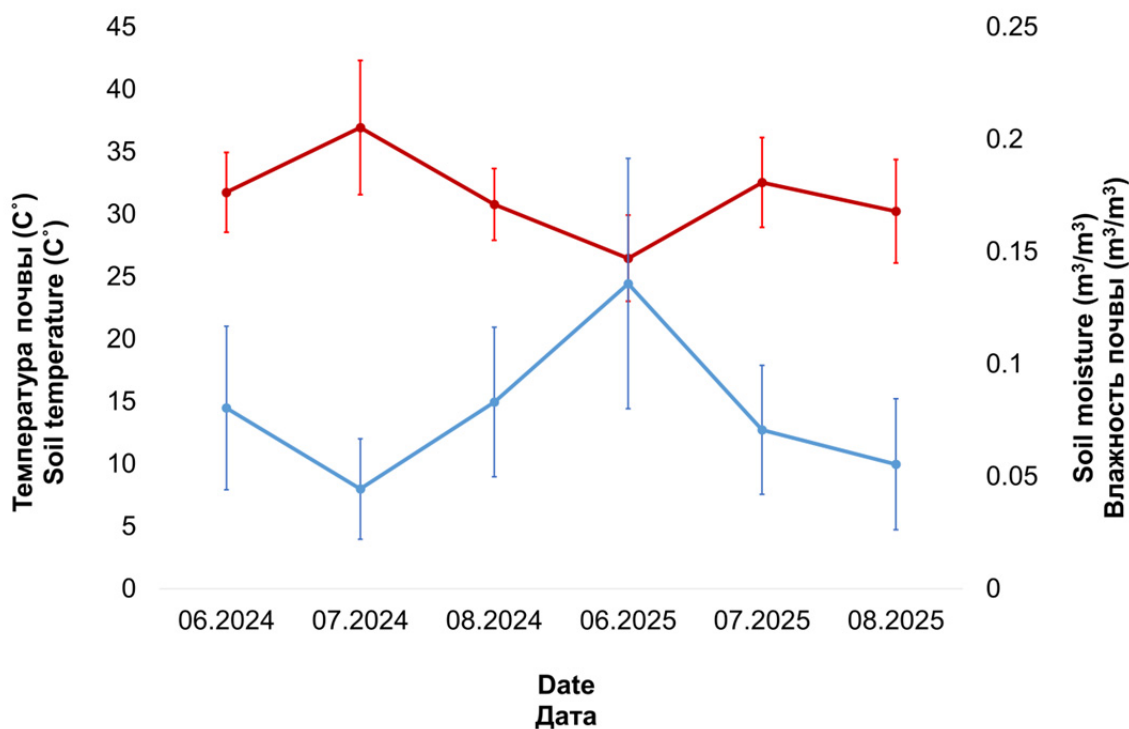


Рисунок 2. Сезонная изменчивость температуры и влажности почвы в летние сезоны 2024 и 2025 годов

Figure 2. Seasonal variability of soil temperature and moisture in the summer seasons of 2024 and 2025

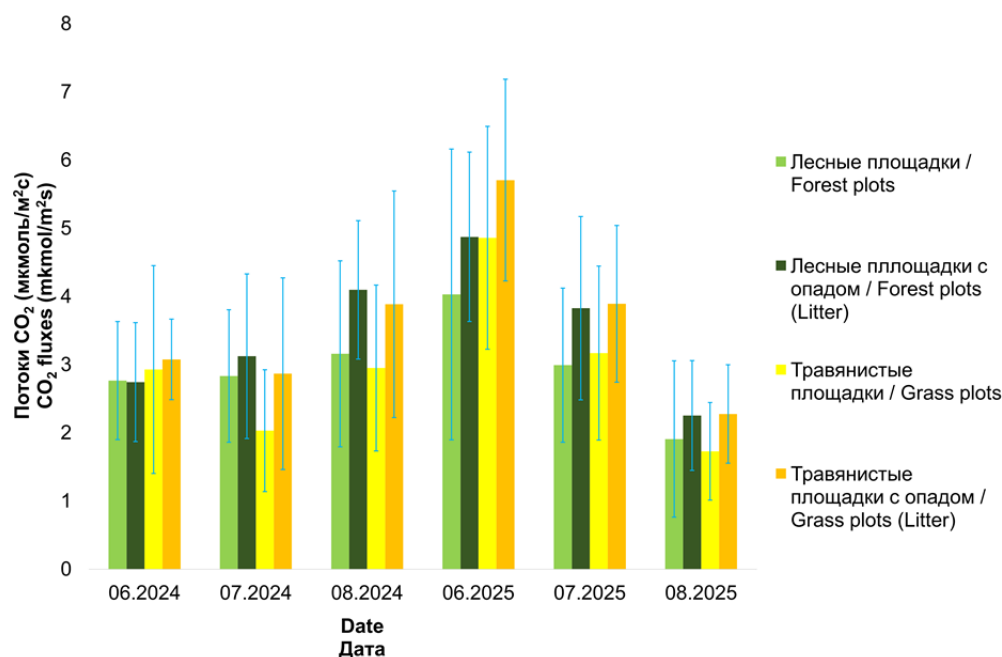


Рисунок 3. Сезонная изменчивость потоков CO₂ на лесных и травянистых участках полигона в летние сезоны 2024 и 2025 годов

Figure 3. The seasonal variability of CO₂ emissions in forest and grassland sites of the carbon polygon in summer seasons of 2024 and 2025

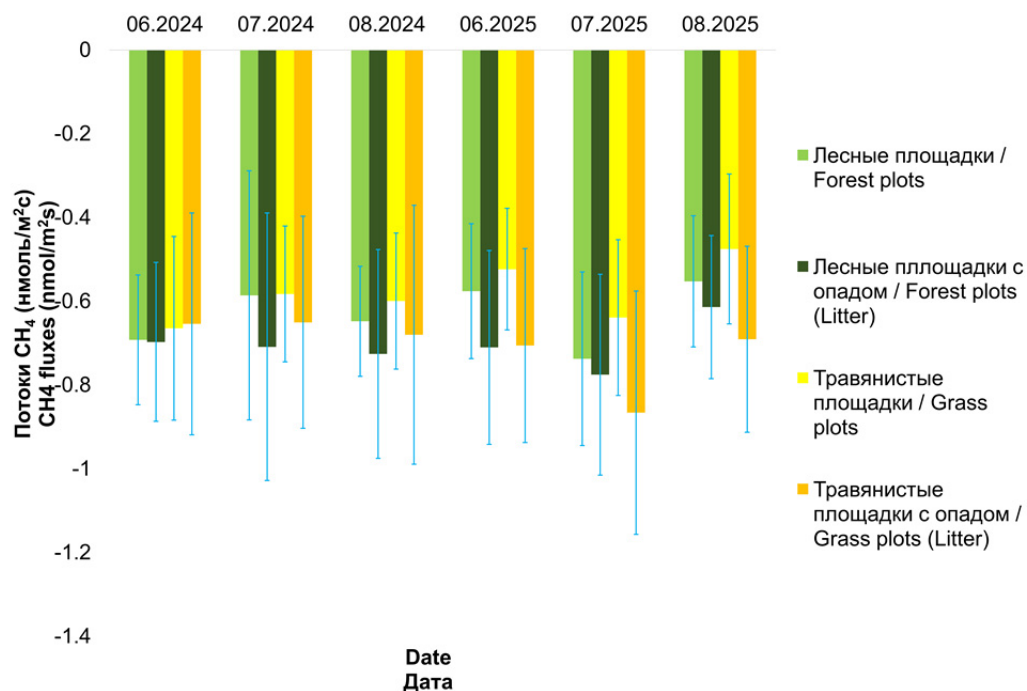


Рисунок 4. Сезонная изменчивость потоков CH₄ на лесных и травянистых участках полигона в летние сезоны 2024 и 2025 годов

Figure 4. The seasonal variability of CH₄ fluxes in forest and grassland sites of the carbon polygon in summer seasons of 2024 and 2025

Поглощение CH₄ также отличалось хорошо выраженной сезонной изменчивостью, хотя ее амплитуда была меньше, чем у потоков CO₂. Максимальные значения поглощения CH₄ наблюдались в июле, когда сочетание температуры и влажности было наиболее благоприятным для функционирования метанотрофов. К августу, на фоне перегрева и дефицита почвенной влаги, интенсивность поглощения CH₄ снижалась. В целом, в течение всего периода наблюдений почвы

сохраняли роль устойчивого поглотителя CH₄, однако величина потоков варьировала в зависимости от микроклиматических условий и структуры растительного покрова (рис. 4).

Анализ роли опада в формировании результирующих потоков, показал, что во все летние месяцы наблюдалось достаточно характерное увеличение эмиссии CO₂ до 20 % на лесных и травянистых участках с опадом по сравнению с

участками без него. Одновременно отмечалась тенденция к усилению поглощения CH_4 в присутствии опада. Исключение составляют потоки CO_2 и CH_4 , измеренные в июне 2024 года, когда существенных различий между вариантами с опадом и без него не выявлено (рис. 3–4).

Таким образом, летняя динамика потоков парниковых газов в 2024–2025 годах отражает тесную взаимосвязь газообмена почвы с температурно-влажностными условиями и структурой растительного покрова. Более благоприятные условия влагообеспеченности и умеренные температуры способствовали устойчивой активности дыхания почвы и усилению поглощения CH_4 , тогда как периоды засухливости сопровождались ослаблением обоих процессов. Особое значение имело присутствие растительного опада, который усиливал эмиссию CO_2 и одновременно

стимулировал поглощение CH_4 , выступая важным регулятором почвенного углеродного обмена в исследуемых экосистемах.

Суточная изменчивость потоков парниковых газов на лесной и травянистой экспериментальных площадках за 2024 год

Для более детального анализа кратковременных колебаний газообмена CO_2 и CH_4 на исследуемой территории были проведены измерения суточной динамики потоков на выбранных репрезентативных площадках в лесной и травянистой частях карбонового полигона летом 2024 года. Эти наблюдения позволили выявить характерные суточные ритмы эмиссии CO_2 и поглощения CH_4 , а также оценить влияние растительного опада и микроклиматических условий на их интенсивность (рис. 5–6).

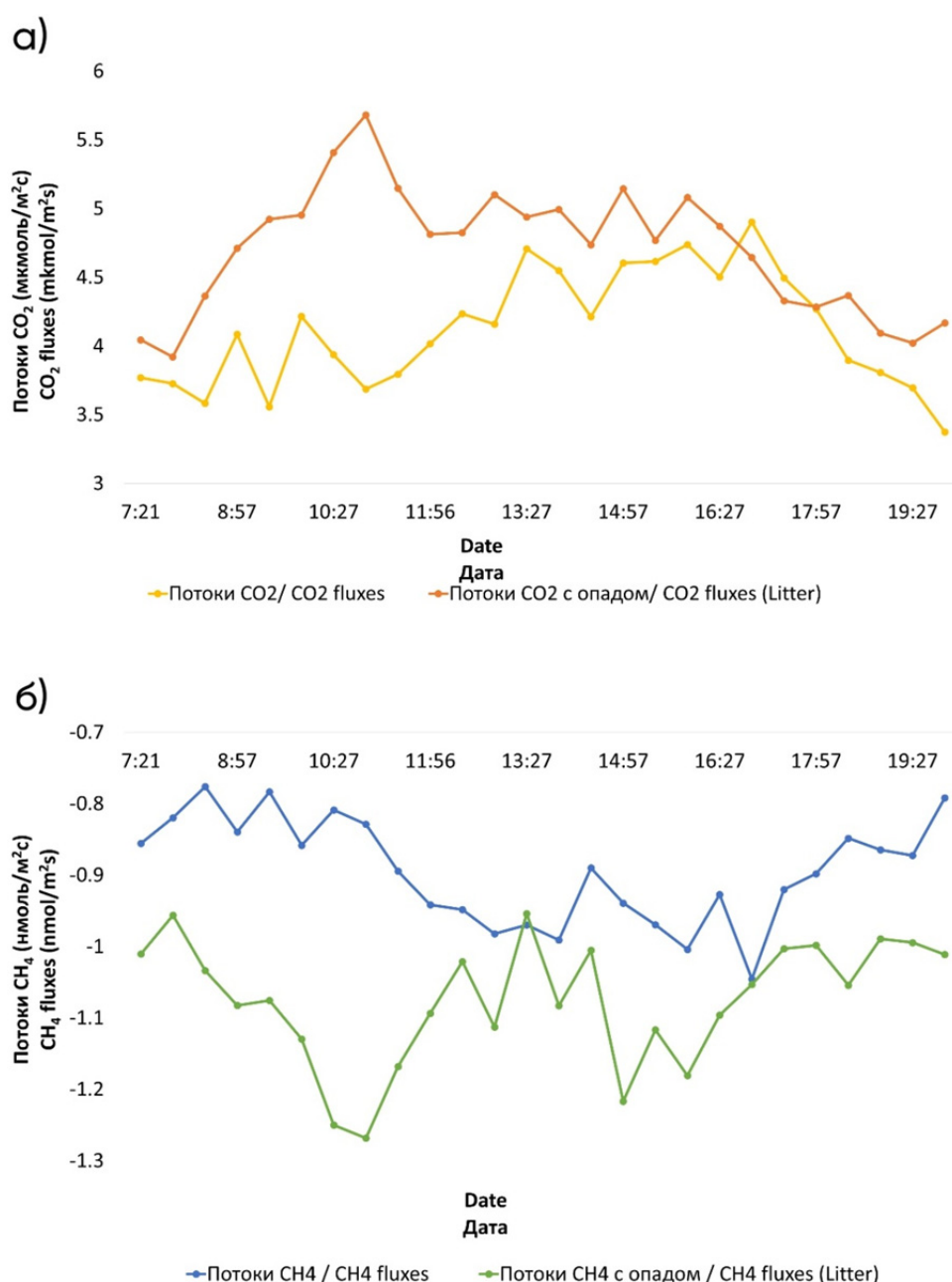


Рисунок 5. Дневной ход потоков парниковых газов (CO_2 – 5а, CH_4 – 5б), на лесной площадке, 2024 год
Figure 5. Diurnal variations in greenhouse gas fluxes (CO_2 – 5a, CH_4 – 5b) at a forest site, 2024

На площадке в северной части полигона, покрытой древесной растительностью, наблюдалась чётко выраженная суточная цикличность эмиссии CO_2 . Максимальные значения регистрировались в утренние часы, когда постепенное повышение температуры почвы активизировало процессы дыхания микроорганизмов и корневых систем растений. К вечеру интенсивность выделения CO_2 снижалась, что отражало спад биологической активности при снижении температуры (рис. 5а). На участках с опадом эмиссия CO_2 была выше, чем на участках без опада, что

указывает на стимулирующее влияние свежего органического субстрата на микробное дыхание.

Поглощение CH_4 на лесной площадке демонстрировало противоположную динамику по отношению к эмиссии CO_2 . Наибольшие значения поглощения приходились на утренние и дневные часы, когда сочетание оптимальной влажности и температуры почвы обеспечивало максимальную активность метанотрофов. На участках с опадом интенсивность поглощения CH_4 была выше, что согласуется с повышенной активностью микробных сообществ верхнего слоя почвы (рис. 5б).

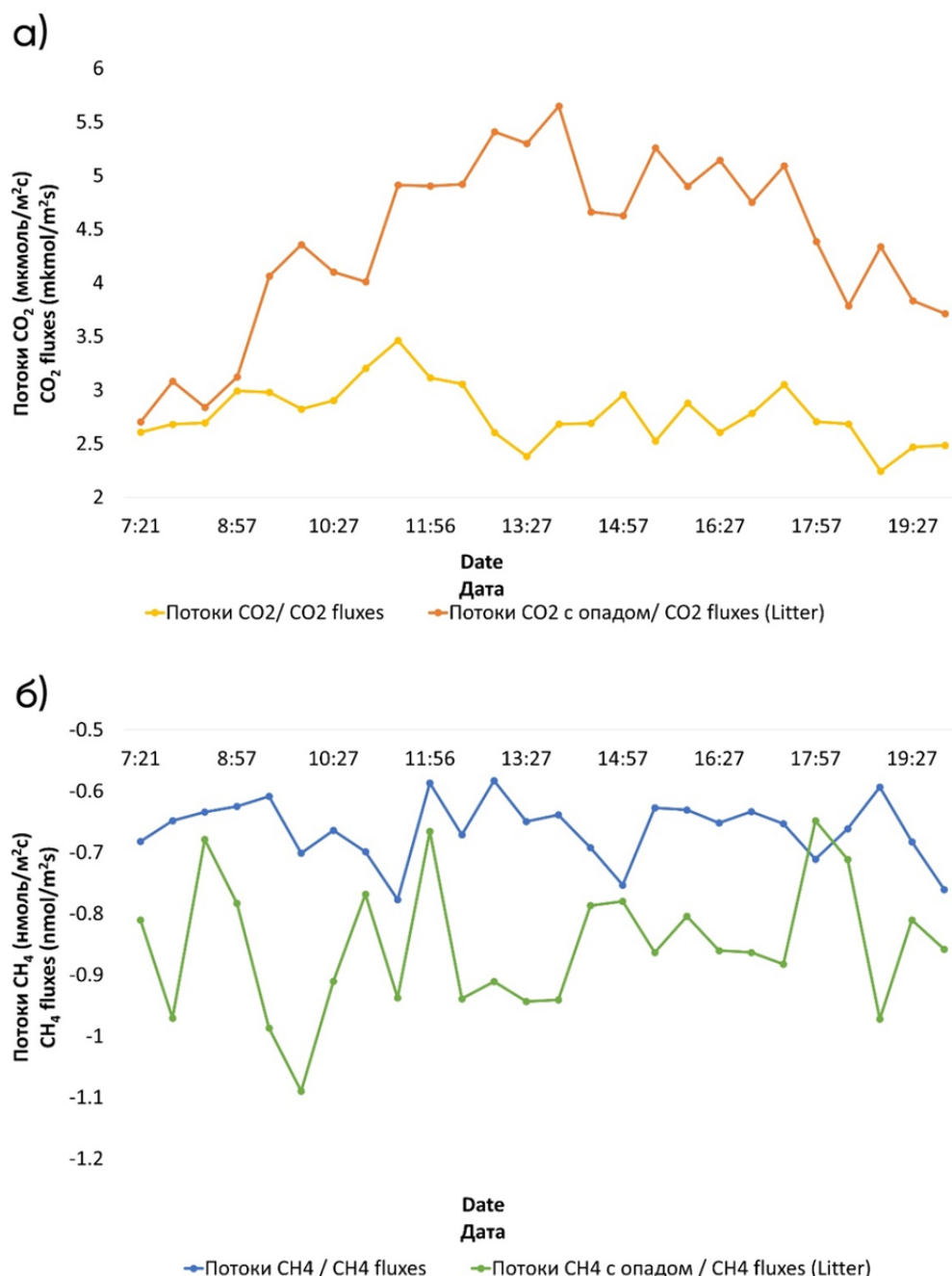


Рисунок 6. Дневной ход потоков парниковых газов (CO_2 – 6а, CH_4 – 6б), на травянистой площадке, 2024 год
Figure 6. Diurnal variations in greenhouse gas fluxes (CO_2 – 6a, CH_4 – 6b) at a grassland site, 2024

В южной части полигона, на участках с травянистой и кустарниковой растительностью (рис. 6а, 6б), амплитуда суточных колебаний потоков парниковых газов у поверхности почвы была значительно выше. Это

обусловлено главным образом отсутствием древесного яруса, и как следствие, более высокой солнечной инсоляцией, вызывающей более резкие колебания температуры поверхности почвы. Пик эмиссии CO_2

приходился на середину дня, совпадая с максимальным прогревом почвы, тогда как минимальные значения наблюдались в ночные и предутренние часы. Поглощение CH_4 также изменялось в течение суток, достигая максимальных значений утром и снижаясь к вечеру на фоне иссушения поверхностного слоя почвы.

В целом, суточная динамика потоков CO_2 и CH_4 отражает тесную связь между активностью почвенной биоты и колебаниями микроклиматических параметров. Наличие растительного опада усиливало как эмиссию CO_2 , так и поглощение CH_4 , что подтверждает его важную роль в поддержании энергетического и функционального баланса почвенных микробных сообществ.

Полученные данные свидетельствуют, что сезонная и суточная динамика потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы в исследованных экосистемах определяется не только метеорологическими условиями, но и структурой растительного покрова, а также наличием растительного опада. Эти факторы влияют на формирование температурно-влажностных условий почвы и активность почвенной микробиоты, что напрямую отражается на интенсивности углеродного обмена.

В обоих типах исследуемых растительных сообществ на карбоновом полигоне наблюдалась четко выраженная сезонная изменчивость потоков, связанная с чередованием влажных и засушливых периодов. При этом на участках с травянистой растительностью амплитуда колебаний была выше, чем в лесных, вследствие большей инсоляции и более резких изменений температуры и влажности верхнего слоя почвы. В дневном ходе потоков CO_2 максимальные значения приходились на середину дня, что совпадало с наибольшим прогревом почвы, тогда как в лесных участках пик эмиссии наблюдался в утренние часы, при оптимальном сочетании температуры и влажности для почвенного дыхания. Суточные изменения поглощения CH_4 почвой, напротив, достигали максимума утром и днем, что связано с активизацией метанотрофных бактерий при умеренной влажности, аналогично закономерностям, отмеченным и для других типов экосистем [16; 17].

Ключевым фактором, определяющим интенсивность почвенных потоков, являлось наличие растительного опада. Его присутствие постоянно усиливало эмиссию CO_2 как на лесных, так и на травянистых участках, что отражает стимулирующее влияние свежего органического субстрата на микробное дыхание (priming effect) [6; 8; 11]. Этот эффект наиболее выражен в периоды оптимального почвенного увлажнения, когда микробное сообщество активно использует поступающий органический материал. Одновременно фиксировалось усиление поглощения CH_4 , что согласуется с результатами других исследований, где наличие опада способствует развитию и активности метанотрофных сообществ [18; 19]. Таким образом, растительный опад не только активизирует дыхательные процессы почвы, но и способствует поддержанию её функции как поглотителя CH_4 .

Сравнение лесных и травянистых участков выявило принципиальные различия в механизмах газообмена. В лесных биотопах с плотным слоем опада эмиссия CO_2 была менее чувствительна к кратковременным температурным колебаниям, а

поглощение CH_4 сохраняло стабильность. Это объясняется буферной ролью слоя опада, который поддерживает постоянную влажность и температуру в верхних горизонтах почвы. На травянистых участках, напротив, высокая инсоляция и иссушение почвы вызывали более сильные суточные колебания: эмиссия CO_2 возрастала днем, а поглощение CH_4 снижалось при сильном перегреве. Подобные различия подчеркивают регулирующее значение структуры растительного покрова для пространственной изменчивости углеродного обмена, что соответствует выводам Лейтнера и др. [18] и Цзяна и др. [19] о важной роли опада и структуры растительного полога в стабилизации микроклиматических условий.

В целом, выявленные различия между лесными и травянистыми экосистемами показывают, что растительный опад является не только источником органического вещества, но и ключевым фактором, стабилизирующим температурно-влажностные условия почвы и активность микробных сообществ. Его влияние прослеживается как в сезонных, так и в суточных масштабах, обеспечивая устойчивость экосистем к изменениям внешней среды.

Таким образом, экосистемы прибрежных районов Краснодарского края характеризуются высокой чувствительностью углеродного обмена к температурно-влажностным параметрам и структурным особенностям растительности. Полученные результаты дополняют существующие представления о региональной специфике почвенного газообмена и могут быть использованы для уточнения параметров моделей углеродного цикла. Интеграция данных наблюдений, полученных на карбоновых полигонах, в биогеохимические модели позволит более точно оценить температурную и влажностную зависимость почвенного дыхания и метанотрофии, а также уточнить вклад южных экосистем России в национальный углеродный баланс [17; 18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что температурно-влажностные условия оказывают решающее влияние на интенсивность почвенного газообмена в прибрежных травянистых и лесных экосистемах Северного Кавказа. Экстремально жаркое и засушливое лето 2024 года сопровождалось снижением активности почвенной микробиоты, что приводило к ослаблению как эмиссии CO_2 , так и поглощению CH_4 . Напротив, более мягкие и более влажные условия лета 2025 года способствовали стабилизации дыхательных процессов и поддержанию более устойчивого газообмена. Эти различия подчёркивают высокую чувствительность экосистем региона к климатическим колебаниям и усилению процессов аридизации.

Одним из ключевых результатов исследования стало подтверждение значимой роли растительного опада как регулятора почвенного углеродного обмена. Его присутствие увеличивало эмиссию CO_2 за счёт стимуляции микробного дыхания и одновременно усиливало процессы метанотрофии, способствуя поглощению CH_4 . Этот эффект соответствует концепции *priming effect* и демонстрирует, что взаимодействие почвы со свежим органическим материалом является важнейшим механизмом формирования экосистемного углеродного баланса.

Сравнение лесных и травянистых экосистем показало, что микроклиматические условия и структура растительности определяют как амплитуду, так и динамику потоков парниковых газов. Более высокие значения эмиссии CO₂ и поглощения CH₄ на участках с преобладанием травянистой растительности связаны с лучшей инсоляцией и более интенсивным прогревом почвы, что подтверждает ведущую роль температурного и светового режимов в регулировании газообмена наземных экосистем.

Учитывая ключевое значение почвенного покрова в регулировании регионального и глобального углеродного баланса, полученные результаты существенно расширяют представления о механизмах углеродного обмена в экосистемах Северного Кавказа – регионе, где дефицит данных наблюдений особенно ощутим на фоне ускоряющихся климатических изменений.

С практической точки зрения результаты исследования могут быть использованы для совершенствования региональных биогеохимических моделей и создания систем мониторинга, обеспечивающих более точное прогнозирование реакции экосистем на процессы аридизации и увеличение повторяемости экстремальных погодных явлений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением временных рядов наблюдений, охватом других сезонов года и экстремальных климатических ситуаций, а также с более детальным изучением роли микробного сообщества и химического состава растительного опада в формировании результирующих потоков. Это позволит уточнить вклад экосистем Северного Кавказа в региональный углеродный баланс и повысить достоверность глобальных прогнозов, учитывающих уязвимость южных регионов России к климатическим изменениям.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность Институту океанологии РАН за помощь в организации полевых работ на карбоновом полигоне в районе Геленджика. Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания (проект № FMWE-2023-0001).

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the assistance of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences in organising fieldwork at the carbon site near Gelendzhik. This work was carried out with financial support from a state funding programme (project No. FMWE-2023-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chapin F.S., Matson P.A., Mooney H.A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer, New York, 2002. 436 p.
2. Olchev A.V. Estimation of Carbon Dioxide and Methane Emissions and Absorption by Land and Ocean Surfaces in the 21st Century // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2025. V. 61. P. 74–100. DOI: 10.1134/S0001433825701166
3. Bond-Lamberty B., Ballantyne A., Berryman E., Fluet-Chouinard E., Jian J., Morris K.A., Rey A., Vargas R. Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2024. V. 129. N 2. 26 p. <https://doi.org/10.1029/2023JG007637>

4. Schaufler G., Kitzler B., Schindlbacher A., Skiba U., Sutton M.A., Zechmeister-Boltenstern S. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature // *European Journal of Soil Science*. 2010. V. 61. P. 683–696. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01277.x>
5. Prescott C.E. Litter decomposition: What controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? // *Biogeochemistry*. 2010. V. 101. P. 133–149. DOI: 10.1007/s10533-010-9439-0
6. Zhang L. et al. Non-Native Plant Litter Enhances Soil Carbon Dioxide Emissions in an Invaded Annual Grassland // *PLoS ONE*. 2014. V. 9. 8 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092301>
7. Sayer E.J. Using experimental manipulation to assess litter effects // *Biological Reviews*. 2006. V. 81. N 1. P. 1–31. DOI: 10.1017/S1464793105006846
8. Cotrufo M.F., Wallenstein M., Boot C., Denef K., Paul E. Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? // *Global Change Biology*. 2013. V. 19. P. 988–995.
9. Кочкина М.В., Солдаткина М.А., Сатосина Е.М., Ильичев И.А., Романенко В.А., Кременецкий В.В., Ольчев А.В., Гулев С.К. Пространственная и временная изменчивость потоков диоксида углерода и метана у поверхности почвы на береговом участке карбонового полигона в Краснодарском крае // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2023. Т. 3. N 4. С. 58–64.
10. Wang B., Zha T. S., Jia X., Wu B., Zhang Y. Q., Qin S. G., Soil moisture modifies respiration/flux response to temperature // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. P. 259–268. DOI: 10.5194/bg-11-259-2014
11. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review // *Biology and Fertility of Soils*. 2008. V. 45. P. 115–133. DOI: 10.1007/s00374-008-0334-y
12. Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter // *Soil Biology & Biochemistry*. 2010. V. 42. P. 1363–1371. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.04.003
13. Гулев С.К., Ольчев А.В. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии. Москва: Научный мир, 2025. 420 с.
14. Куричева О.А., Авилов В.К., Варлагин А.В., Гитарский М.Л., Дмитриченко А.А. и др. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux // *Известия РАН. Серия Географическая*. 2023. Т. 87. N 4. С. 512–535. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>
15. Методические рекомендации для организации проведения метеорологических наблюдений, измерений потоков парниковых газов и составляющих углеродного баланса на карбоновых полигонах и их обработки. URL: <https://car-bonpolygons.ru/assets/EC-meteo-observationsguide.pdf> (дата обращения: 26.09.2025)
16. Bowden R.D., Newkirk K.M., Rullo G.M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions // *Soil Biology and Biochemistry*. 1998. V. 30. N 12. P. 1591–1597.
17. Jiang J., Wang, Y.-P., Zhang, H., Yu, M., Liu, F., Xia, S., Yan, J. et al. Contribution of Litter Layer to Greenhouse Gas Fluxes between Atmosphere and Soil Varies with Forest Succession // *Forests*. 2022. V. 13. N 4. Article id: 544. <https://doi.org/10.3390/f13040544>
18. Leitner S., Sae-Tun O., Kranzinger L., Zechmeister-Boltenstern S., Zimmermann M. Contribution of litter layer to soil greenhouse gas emissions in a temperate beech forest // *Plant and Soil*. 2016. V. 403. P. 455–469. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2771-3>
19. Walkiewicz A., Rafalska A., Bulak P., Bieganski A., Osborne B. How Can Litter Modify the Fluxes of CO₂ and CH₄ from Forest Soils? A Mini-Review // *Forests*. 2021. V. 12. Article id: 1276. <https://doi.org/10.3390/f12091276>

REFERENCES

1. Chapin F.S., Matson P.A., Mooney H.A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer, New York, 2006, 436 p.

2. Olchev A.V. Estimation of Carbon Dioxide and Methane Emissions and Absorption by Land and Ocean Surfaces in the 21st Century. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2025, vol. 61, pp. 74–100. DOI: 10.1134/S0001433825701166
3. Bond-Lamberty B., Ballantyne A., Berryman E., Fluet-Chouinard E., Jian J., Morris K.A., Rey A., Vargas R. Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2024, vol. 129, no. 2, 26 p. <https://doi.org/10.1029/2023JG007637>
4. Schaufler G., Kitzler B., Schindlbacher A., Skiba U., Sutton M.A., Zechmeister-Boltenstern S. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science*, 2010, vol. 61, pp. 683–696. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01277.x>
5. Prescott C.E. Litter decomposition: What controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*, 2010, vol. 101, pp. 133–149. DOI: 10.1007/s10533-010-9439-0
6. Zhang L. et al. Non-Native Plant Litter Enhances Soil Carbon Dioxide Emissions in an Invaded Annual Grassland. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9, 8 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092301>
7. Sayer E.J. Using experimental manipulation to assess litter effects. *Biological Reviews*, 2006, vol. 81, no. 1, pp. 1–31. DOI: 10.1017/S1464793105006846
8. Cotrufo M.F., Wallenstein M., Boot C., Deneff K., Paul E. Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*. 2013, vol. 19, pp. 988–995.
9. Kochkina M.V., Soldatkina M.A., Satosina Ye.M., Il'ichev I.A., Romanenko V.A., Kremenetskiy V.V., Ol'chev A.V., Gulev S.K. Spatial and temporal variability of carbon dioxide and methane fluxes near the soil surface in the coastal area of the carbon polygon in Krasnodar Krai. *Groznenskiy estestvennonauchnyi byulleten'* [Grozny Natural Science Bulletin]. 2023, vol. 8, no. 4(34), pp. 58–64. (In Russian)
10. Wang B., Zha T.S., Jia X., Wu B., Zhang Y.Q., Qin S.G. Soil moisture modifies respiration/flux response to temperature. *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, pp. 259–268. DOI: 10.5194/bg-11-259-2014
11. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, vol. 45, pp. 115–131. DOI: 10.1007/s00374-008-0334-y
12. Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, vol. 42, pp. 1363–1371. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.04.003
13. Gulev S.K., Olchev A.V. *Karbonovye poligony: monitoring, geoinformatsionnye sistemy, sekvestratsionnye tekhnologii* [Carbon Polygons: Monitoring, Geographic Information Systems, and Sequestration Technologies]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2025, 420 p. (In Russian)
14. Kuricheva O.A., Avilov V.K., Varlagin A.V., Gitarskii M.L., Dmitrichenko A.A., et al. Monitoring of ecosystem fluxes of greenhouse gases in Russia: the RuFlux network. *Izvestiya Rossiiskaya Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 512–535. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>
15. Methodological recommendations for organizing meteorological observations, measuring greenhouse gas flows and carbon balance components at carbon polygons and their processing. Available at: (accessed 26.09.2025). (In Russian)
16. Bowden R.D., Newkirk K.M., Rullo G.M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biology and Biochemistry*. 1998, vol. 30, no. 12, pp. 1591–1597.
17. Jiang J., Wang Y.-P., Zhang H., Yu M., Liu F., Xia S., Yan J., et al. Contribution of litter layer to greenhouse gas fluxes between atmosphere and soil varies with forest succession. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 4, article id: 544. <https://doi.org/10.3390/f13040544>
18. Leitner S., Sae-Tun O., Kranzinger L., Zechmeister-Boltenstern S., Zimmermann M. Contribution of litter layer to soil greenhouse gas emissions in a temperate beech forest. *Plant and Soil*, 2016, vol. 403, pp. 455–469. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2771-3>
19. Walkiewicz A., Rafalska A., Bulak P., Bieganski A., Osborne B. How can litter modify the fluxes of CO₂ and CH₄ from forest soils? A mini-review. *Forests*, 2021, vol. 12, article id: 1276. <https://doi.org/10.3390/f12091276>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Маргарита В. Кочкина проводила анализ и обработку данных. Александр В. Ольчев редактировал рукопись. Дарья А. Карпунина, Дарья С. Леонова и Владимир В. Пушкин проводили полевые исследования. Александр А. Полухин и Сергей К. Гулев занимались задачами администрирования и финансирования исследований. Маргарита В. Кочкина и Александр В. Ольчев написали рукопись. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Margarita V. Kochkina performed the data analysis and processing. Alexander V. Olchev edited the manuscript. Daria A. Karpunina, Daria S. Leonova and Vladimir V. Pushkin conducted the field observations. Alexander A. Polukhin and Sergey K. Gulev were responsible for research administration and funding. Margarita V. Kochkina and Alexander V. Olchev wrote the manuscript. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Маргарита В. Кочкина / Margarita V. Kochkina <https://orcid.org/0009-0000-2763-8344>
 Дарья А. Карпунина / Daria A. Karpunina <https://orcid.org/0009-0004-5027-7750>
 Дарья С. Леонова / Daria S. Leonova <https://orcid.org/0009-0008-7806-0659>
 Владимир В. Пушкин / Vladimir V. Pushkin <https://orcid.org/0009-0008-5702-1693>
 Александр В. Ольчев / Alexander V. Olchev <https://orcid.org/0000-0002-6144-5826>
 Александр А. Полухин / Alexander A. Polukhin <https://orcid.org/0000-0003-1708-1428>
 Сергей К. Гулев / Sergey K. Gulev <https://orcid.org/0000-0002-4296-5121>